

УДК 551.524.7; 551.583.16; 551.589

Температура воздуха в нижней тропосфере над Москвой во время аномальной жары летом 2010 г.

М.А. Локощенко¹, И.А. Корнева¹, А.З. Дубовецкий², А.В. Кочин^{2*}

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119899, г. Москва, ГСП-3, Воробьевы горы

² Центральная аэрологическая обсерватория

141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 20.07.2015 г.

Исследованы изменения температуры воздуха в нижнем 4-км слое по данным радиозондирования в Долгопрудном и станционных наземных измерений в МГУ во время аномальной жары летом 2010 г. Результаты сопоставлены с аэроклиматическими данными за предыдущие 19 лет. По этим данным для летних месяцев приведены среднегодовые оценки для Московского региона вертикального градиента температуры днем, а также мощности и интенсивности приземных инверсий ночью (соответственно – 200–300 м и 2,0 °С). Показано, что в слое воздуха вплоть до 2 км над Москвой летом 2010 г. была отмечена рекордно высокая температура за период с 1991 г., в том числе в слое от 400 до 800 м было впервые превышено значение 30 °С.

Во время аномальной жары 2010 г., вследствие ярко выраженных антициклональных условий, над Москвой ночью отмечались в среднем более мощные и более интенсивные приземные инверсии (вплоть до 700 м и 12 °С) по сравнению с обычными значениями. Исследованы средние профили температуры в условиях господства разных типов воздушных масс. Показано, что тропический воздух господствовал в районе Москвы большую часть лета 2010 г.

Ключевые слова: температура воздуха, радиозондирование, аэроклиматология, приземные инверсии, неустойчивая стратификация, синоптический анализ, воздушная масса; air temperature, radio-sounding, aeroclimatology, surface inversions, unstable stratification, synoptic analysis, air mass.

Введение

Климатические изменения, а также аномальные погодные явления обычно изучаются по данным наблюдений лишь наземной метеорологической сети. Между тем накопленные архивы многолетних данных радиозондирования позволяют осуществить аэроклиматический анализ температуры воздуха на разных высотах в пределах досягаемости радиозондов (вплоть до 25–30 км), включая и нижнюю тропосферу (до 3–4 км).

Начиная с конца 1980-х гг. радиозондирование на аэрологических станциях бывшего СССР и России осуществляется с использованием радиозондов серии МРЗ или их аналогов, датчиком температуры в них служит полупроводниковый медно-марганцевый термометр сопротивления (ММТ). Коэффициент инерции (постоянная времени) этого датчика составляет по разным оценкам от 5–6 [1] до 7 с [2]. Данный коэффициент показывает среднее время уменьшения исходной разности температуры самого датчика и окружающей воздушной среды в 8 раз (т.е. на 63%). Заметим, что датчики ММТ широко

используются еще с конца 1960-х гг., когда началось массовое внедрение оснащенных ими зондов серии РКЗ на аэрологической сети СССР. Незменность вида датчика температуры на протяжении нескольких десятилетий обеспечивает однородность накопленных рядов аэроклиматических данных о температуре воздуха на разных высотах.

Аномальная жара, наблюдавшаяся летом 2010 г. на европейской территории России (ЕТР), явилась самой сильной и продолжительной тепловой аномалией в истории метеорологических наблюдений этого региона. На протяжении 2 мес приземная температура воздуха непрерывно превышала средние климатические значения на огромной территории размером примерно 1 тыс. км. Это явление привлекло большое внимание научной общественности. Значения основных метеорологических величин в приземном слое воздуха, а также условия долгоживущего блокирующего антициклона летом 2010 г. и уровни загрязнения атмосферы в Москве изучены во многих работах [3–6 и др.]. Однако результатов исследований термического режима на высотах опубликовано крайне мало, а подробный синоптический анализ с определением типов господствовавших в то время воздушных масс, по-видимому, не осуществлен до сих пор. Восполнению данных пробелов в изучении условий аномальной жары летом 2010 г. и посвящена настоящая статья.

* Михаил Александрович Локощенко (loko@geogr.msu.ru); Ирина Алексеевна Корнева (comissa@mail.ru); Александр Васильевич Кочин (amarl@mail.ru); Андрей Зигмундович Дубовецкий (to.dandy@gmail.com).

1. Данные радиозондирования и методы исследования

В Московском регионе регулярное радиозондирование осуществляется с 1941 г. в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) в г. Долгопрудном, в 2 км к северу от современной границы Москвы. С 1988 г. здесь используются радиозонды МРЗ-ЗА, ведомые радиолокаторами АВК или МАРЛ. Начиная с 1993 г. выпуск зондов производится дважды в сутки (ночью и днем) в стандартные сроки в 02:30 и 14:30 по зимнему московскому времени.

Программный комплекс АВК позволяет получать данные радиозондирования о метеорологических величинах на фиксированных высотах над уровнем станции, кратных 100 м в нижнем 1-км слое, а также на высотах 2 и 4 км. Кроме того, доступны приземные данные о температуре воздуха T и относительной влажности на стандартной высоте 2 м перед каждым выпуском радиозонда по показаниям как его датчиков, так и наземных приборов — психрометров Ассмана или Августа в стандартной английской метеорологической будке (будке Стивенсона). Авторами создана единая электронная база всех данных радиозондирования в ЦАО на высотах от 2 до 4000 м за период с 1991 по 2013 г. Для анализа использованы данные этой базы, а также архива наземных наблюдений в Метеорологической обсерватории МГУ в летние месяцы.

Исследование динамики термического режима по данным радиозондирования сопряжено с методической неопределенностью. Перед выпуском показания радиозонда сравниваются со значениями температуры по данным термометра ТМ-4 в метеорологической будке. Допуск радиозонда к полету составляет $\pm 1,8^\circ\text{C}$ [7], так что показания температуры по радиозонду могут значительно отличаться от наземных эталонных измерений. В связи с этим представляется целесообразным приведение полученных радиозондом значений T к показаниям станционного термометра T_c с помощью поправочной разности ($T - T_c$) на уровне 2 м в предположении ее неизменности с высотой. Таким образом, все данные аэрологических измерений в слое от

100 м до 4 км были пересчитаны нами с учетом введенной поправочной разности.

2. Сравнение данных, полученных летом 2010 г., с многолетними значениями

Как показано в [5], наблюдавшиеся в Москве летом 2010 г. (данные Метеорологической обсерватории МГУ) значения T вплоть до $38,1^\circ\text{C}$ 29 июля превысили соответствующие значения за всю историю инструментальных метеорологических измерений (предыдущий максимум-максимум, отмеченный 7 августа 1920 г. и продержавшийся 90 лет, составлял для Москвы $36,8^\circ\text{C}$). Очевидно, что интенсивный прогрев поверхности во время аномальной жары должен был привести к достижению рекордно высоких значений T и во всей толще нижней тропосферы.

Для проверки этого предположения рассмотрим на рис. 1 ход температуры воздуха, по данным радиозондирования в ЦАО, за каждый день лета 2010 г.

Здесь приведены средние значения за ночной и дневной выпуски зондов для четырех высот (2, 500, 1000 и 4000 м) только в те дни, когда выпускались оба зонда (днем выпуски иногда отменяются из-за запретов Управления воздушным движением, а ночью производятся почти всегда). Заметим, что время выпусков выбрано удачно, поскольку среднее из двух отсчетов в 02:30 и 14:30 очень близко к истинному среднесуточному значению температуры T_{cp} . В среднем за 5 лет, по ежечасным данным станционного термографа в Метеорологической обсерватории МГУ, средние значения из этих двух сроков (как средних соответственно за 2–3 ч и за 14–15 ч) в кельвинах относятся к среднесуточной температуре (среднему из 24 отсчетов за каждый час) как 0,999 : 1,000 при значении стандартного отклонения лишь 0,003. Данные радиозондирования в ЦАО на рис. 1 дополнены также непрерывным рядом значений T_{cp} у земли в Метеорологической обсерватории МГУ (в 24 км к югу от ЦАО). Период аномальной жары определен нами

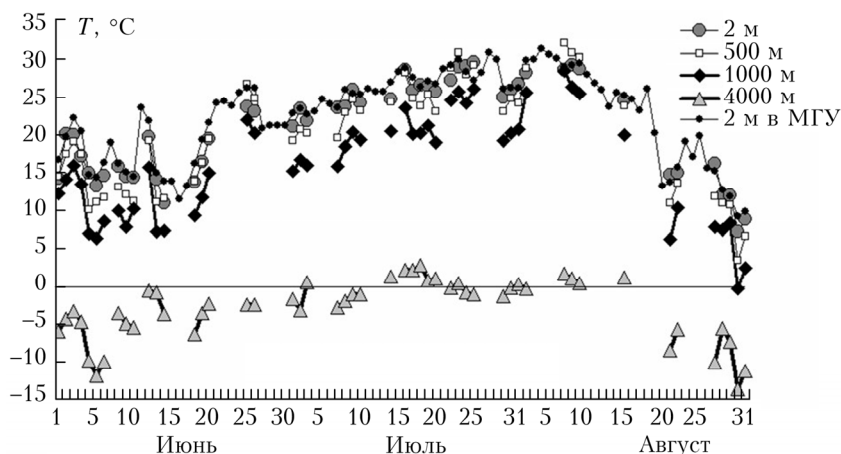


Рис. 1. Температура воздуха на высотах от 2 м до 4 км над Москвой и пригородами летом 2010 г.

как время непрерывного превышения $T_{\text{ср}}$ по сравнению с ее средними значениями для каждого отдельного дня за период 1961–1990 гг. (климатической нормой, действовавшей вплоть до последнего времени). При таком подходе этот период составил 61 день – с 20 июня по 19 августа 2010 г., хотя отдельные короткие эпизоды жаркой погоды наблюдались и в начале лета (например, 12–13 июня).

Как видно на рис. 1, аномальная жара действительно проявилась во всем рассматриваемом 4-км слое воздуха. Даже на уровне 4 км средние значения T , по данным ночного и дневного зондов, летом 2010 г. 13 раз оказались положительными, что случается крайне редко. С высотой ход температуры становится более сглаженным, и ее изменения от дня ко дню выражены слабее. В соотношениях значений T на разных высотах проявляются особенности ночных и дневных профилей температуры. Так, на уровне 1 км температура воздуха, как правило, существенно меньше, чем у поверхности. Однако 7 августа оба значения почти совпали (на уровне 1 км T оказалась лишь на 0,15 °C меньше, чем на уровне 2 м) вследствие слабоустойчивой ($\gamma = -\partial T/\partial z < 0,98$ °C/100 м) стратификации днем, а также необычно сильной приземной инверсии ночью: 11,6 °C в нижнем 300-м слое.

Были построены также средние летние профили T в слое до 4 км за предыдущие 19 лет (рис. 2). Условно их можно считать аэроклиматической нормой для Московского региона. Для сравнения здесь же приведены средние профили для периода всего календарного лета (с 1 июня по 31 августа) 2010 г., а также для одного из двух самых жарких дней – 2 августа 2010 г. Заметим, что новый абсолютный максимум температуры воздуха на уровне 2 м – 38,1 °C по станции МГУ – был получен 29 июля, однако дневного выпуска зонда в ЦАО в тот день не было из-за запрета. Четыре дня спустя (2 августа) приземная T оказалась почти столь же высокой (38,0 °C).

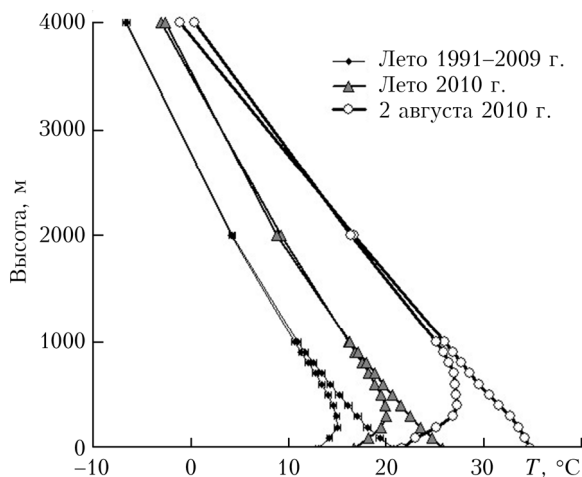


Рис. 2. Профили температуры воздуха по данным радиозондирования в г. Долгопрудном в летние месяцы в среднем за период 1991–2009 гг. и в 2010 г. Доверительные интервалы для данных за 1991–2009 гг. рассчитаны с уровнем значимости 0,01

Как видим, в среднем за 19 лет летней ночью в Московском регионе существует приземная инверсия мощностью 200–300 м (средние значения T на этих высотах составили 15,0 °C и совпали с точностью до $\pm 0,1$ °C) и интенсивностью (силой) 2,0 °C. Днем в нижнем 300-м слое отмечается сверхадиабатический вертикальный градиент температуры воздуха $\gamma = -\partial T/\partial z > 0,98$ °C/100 м: в пределах нижних 100 м γ составляет в среднем +1,39; в слое от 100 до 200 и от 200 до 300 м соответственно +1,30 и +1,01, а в слое от 300 до 400 м: +0,95 °C/100 м. Суточный ход T ярко выражен лишь в приземном слое воздуха (на высотах 2 и 100 м средняя разность значений T в середине дня и ночи равна соответственно 7,7 и 5,2 °C). С высотой эта разность быстро убывает и в слое воздуха выше 1 км практически сходит на нет (на высоте 1 км она еще равна 0,3 °C, а на 2 км – лишь 0,09 °C).

Летом 2010 г. (рис. 2) оценки T на всех высотах были сильно смещены в сторону более высоких значений. Их превышения по сравнению со средне-многолетними величинами, безусловно, статистически значимы с учетом доверительных интервалов, построенных с доверительной вероятностью 0,99. Различия в оценках 2010 г. и предыдущих 19 лет велики, несмотря на то что границы календарного лета 2010 г. включали в себя периоды холодной погоды в начале июня и в конце августа, до и после аномальной жары. Заметим, что средняя интенсивность приземных инверсий летом 2010 г. составила 4,4 °C, а их мощность – около 320 м (приземные инверсии наблюдались в 75 из 88 ночных летних выпусков, т.е. в 85% всех случаев ночью). В среднем же только за период непрерывной жары (с 20 июня по 19 августа) интенсивность и мощность приземных инверсий оказались еще больше: 5,0 °C и 350 м соответственно. Это вполне ожидаемо с учетом господства блокирующего антициклона, способствующего выхолаживанию ночью подстилающей поверхности при ясном небе. Наибольшая интенсивность приземной инверсии составила 25 июня 12,5 °C, а ее наибольшая мощность достигла 4 августа даже 700 м (!). Заметим, что с учетом неизбежной инверсии температурного датчика радиозонда, а также его охлаждения вследствие теплового излучения в процессе подъема в слое приземной инверсии реальная ее интенсивность могла быть еще больше.

Как известно из данных аэростатного зондирования, интенсивность приземных инверсий составляет в Московском регионе обычно от 3 до 7 °C в теплый период года [8] и от 6 до 8 °C в холодный [9]. По многолетним данным высотной мачты в Обнинске, очень сильные приземные инверсии интенсивностью более 10 °C наблюдаются в нижнем 300-м слое лишь в 1–3% случаев [10]. Как видим, во время аномальной жары 2010 г. значения интенсивности были столь же велики. Рекордные в СССР значения этого показателя составили в прошлом, по данным [11], 18 °C в нижнем 113-м слое воздуха, а по данным [12], над Москвой – даже 24 °C во время сильнейших морозов в январе 1940 г.

Наконец, один из двух самых жарких дней в Москве (по меньшей мере, с 1879 г.) отмечен еще более высокой температурой воздуха, чем в среднем за все лето. Так, в середине ночи 2 августа на уровне 2 м T оказалась даже больше (21,7 °С), нежели в середине дня в среднем за предыдущие 19 лет (20,8 °С). Приземная инверсия в эту ночь в условиях ярко выраженной антициклональной погоды (ясное небо и полный штиль у поверхности земли в Долгопрудном) оказалась более мощной (с вершиной на уровне 400 м) и более сильной (5,6 °С) по сравнению с обычными значениями.

Заметим, что дневной профиль T в среднем за все лето 2010 г., несмотря на преимущественно ясное небо и открытый диск Солнца, не показал более сильной неустойчивости по сравнению с другими годами: сверхадиабатическое уменьшение температуры с высотой ($\gamma > 0,98$ °С/100 м) было ограничено с июня по август тем же самым 300-м слоем воздуха, что и в среднем за 19 лет, а сами послонные значения γ оказались даже меньше обычных: 1,1 °С/100 м в слоях от 2 до 100 и от 100 до 200 м и 1,0 °С/100 м в слое от 200 до 300 м. Очевидная причина этого — преобладавшая летом 2010 г. интенсивная теплая адвекция, неизбежно приводящая к ослаблению атмосферной неустойчивости.

Наибольшие значения T летом 2010 г. и за предыдущие годы сопоставлены в таблице. Наряду с максимальными оценками температуры воздуха на разных высотах за период с 1991 г., здесь приведены и максимумы летом 2002 г., когда в Москве также наблюдалась аномальная жара. Тем не менее ни один из рекордов T за предыдущие 11 лет ни на одной из высот летом 2002 г. не был превышен. Летом же 2010 г., напротив, на всех высотах, кроме только самой верхней (4 км), наблюдались значения T , которые на 3,2–4,8 °С больше рекордов за предшествующие 19 лет.

Максимальная температура воздуха на разных высотах в ЦАО в 2002, 2010 гг. и в среднем за период 1991–2009 гг. (значения приведены с учетом поправки на показания термометра в будке)

| Высота, м | Максимум температуры воздуха, °С | | |
|-----------|----------------------------------|---------|---------|
| | 1991–2001, 2003–2009 гг. | 2002 г. | 2010 г. |
| 2 | 32,7 | 30,8 | 37,4 |
| 100 | 31,9 | 29,1 | 35,5 |
| 200 | 30,8 | 27,7 | 34,5 |
| 300 | 30,1 | 26,7 | 33,6 |
| 400 | 29,6 | 25,8 | 32,8 |
| 500 | 28,8 | 24,9 | 32,0 |
| 600 | 27,9 | 23,9 | 31,4 |
| 700 | 26,8 | 22,9 | 31,2 |
| 800 | 25,8 | 21,9 | 30,3 |
| 900 | 24,7 | 20,9 | 29,5 |
| 1000 | 24,3 | 19,9 | 28,9 |
| 2000 | 15,9 | 11,0 | 20,4 |
| 4000 | 5,1 | 1,7 | 3,9 |

Таким образом, в результате аномальной жары 2010 г. на высотах от 400 до 800 м над поверхностью в районе столицы температура воздуха впервые с 1991 г. превысила 30 °С. Заметим также, что

на высотах более 600 м превышение прежних рекордных показателей оказалось значительно выше (более 4 °С), чем в нижележащем слое воздуха, что говорит о большой вертикальной протяженности блокирующего антициклона и связанной с ним тепловой аномалии.

3. Результаты синоптического анализа

Классический синоптический анализ помимо общей характеристики барического поля и циркуляционных условий предполагает также определение географического типа господствующей воздушной массы. Однако на практике многообразие смешанных и переходных типов масс часто затрудняет их определение. В [13] было предложено определять тип воздушной массы лишь для отдельных промежутков времени, когда он проявляется однозначно и отвечает диапазонам характеристических значений всех или почти всех метеорологических величин, известным по ряду источников [14–16 и др.].

Заметим, что современные изменения климата, вероятно, заключаются скорее в изменении повторяемости вхождений воздушных масс того или иного типа, нежели в изменениях этих типов как таковых. Сами по себе оценки характерных для разных воздушных масс значений основных показателей едва ли заметно изменились за последние десятилетия. Во всяком случае, это должно быть справедливо для тропического воздуха с учетом сравнительно медленного потепления климата в тропиках — в очагах его формирования. Поэтому будем использовать ниже для выявления типов воздушных масс их характеристические оценки, полученные в прошлом столетии, — поскольку иных, более новых данных о них в литературе нет. К тому же летом 2010 г. среднесуточная температура воздуха в Москве, как правило, намного превышала известные классические оценки для континентального тропического воздуха в условиях столицы (25 °С по данным [15] или 26 °С по данным [16]) и даже 7 раз превысила значение 30 °С [5], считающееся в ЕТР обычным для максимальной температуры воздуха при господстве континентального тропического воздуха (кТВ) [16]. Таким образом, тропическое происхождение воздушных масс, преобладавших летом 2010 г. в районе Москвы, не вызывает сомнений.

Для проведения анализа условий лета 2010 г. в распоряжении авторов имелся архив синоптических карт приземного анализа, абсолютной барической топографии (АТ₈₅₀ и АТ₅₀₀), а также крупномасштабных кольцевых карт для ЕТР. Кроме того, использовались расчеты обратных траекторий воздушных частиц по модели NOAA (Национального управления океанических и атмосферных исследований США) HYSPLIT [17]. Первоначально по этим данным выявлялся предполагаемый очаг воздушной массы, господствовавшей над Московским регионом в тот или иной день; затем тип массы уточнялся путем сравнения станционных данных

МГУ с характеристическими значениями основных метеорологических величин (среднесуточной T_{cp} и максимальной T_{max} температуры воздуха, упругости водяного пара e , абсолютной a и удельной q влажности, а также дальности видимости D) для разных типов. Заметим, что (в отличие от эквивалентно-потенциальной температуры) T_{cp} и T_{max} не являются консервативными характеристиками воздушной массы, но тем не менее традиционно широко используются для выявления ее типа.

Оказалось, что почти весь период аномальной жары над столицей отмечался кТВ или, в редких случаях, он же, частично трансформированный в континентальный полярный (умеренный) воздух (кУВ). Как известно, трансформация воздушной массы обычно считается завершённой, когда постепенное изменение T_{cp} ото дня ко дню уменьшается до значения менее 1°C [15].

Тропический воздух начиная с конца июня неизменно поступал в район Москвы вдоль южной и западной периферии блокирующего антициклона, обычно из района Каспийского моря, Казахстана или Средней Азии (пример 2 августа на рис. 3, а), иногда — из Восточного Средиземноморья. Однако 12–13 июня, еще до образования блокирующего антициклона, произошло вхождение кТВ также и из Северной Африки. За время существования этого антициклона лишь один раз (4–5 июля) над Москвой недолго господствовала местная воздушная масса, соответствовавшая почти всем признакам кУВ. Как видно на рис. 3, б, Москва в это время находилась в промежутке между главными атмосферными фронтами — арктическим и полярным, в зоне господства полярного воздуха.

Анализ показывает, что данная воздушная масса представляла собой прежний арктический воздух, пришедший ранее из Карского моря и почти полностью трансформированный в местную массу, т.е. в кУВ (исходное ее арктическое происхождение проявилось 5 июля лишь в большой дальности видимости $D = 25$ км, все же остальные показатели соответствовали типичным для кУВ значениям). Как известно, показатели влажности меняются значительно медленнее по сравнению с температурой воздуха. Наиболее же консервативной характеристикой воздушной массы из числа рассмотренных нами является дальность видимости: в процессе трансформации она дольше всего сохраняет значения, отражающие ее прежний тип.

Примечателен также вид обратной траектории движения воздушной частицы 5 июля на уровне 1 км: она демонстрирует циркуляцию вдоль полузамкнутого контура (периферии блокирующего антициклона), что весьма характерно для процессов трансформации; сходный пример замкнутых обратных траекторий приведен также в [4].

Как показано Володиным и Дымниковым [3], одной из важнейших предпосылок аномальной жары в то лето послужила предшествовавшая ей сильная засуха в Прикаспийской низменности и в Среднем и Нижнем Поволжье. Вследствие этого тропи-

ческий воздух, поступавший в Московский регион из более южных широт, не успевал в процессе своего движения трансформироваться в местную (полярную) воздушную массу. Заметим, что данное обстоятельство проявилось в сравнительно невысоких значениях характеристик влажности e , a и q . Эти показатели в конце июля и в начале августа, по стационарным данным МГУ, в большинстве случаев находились в промежутке между их средними характеристическими значениями для кТВ и кУВ, хотя тропический характер воздуха в то время был очевиден. Таким образом, господствовавшая в это время над Москвой тропическая воздушная масса была необычно сухой.

Из результатов анализа последних дней аномальной жары (рис. 4) видно, что вплоть до 18 августа над районом столицы еще господствовал континентальный тропический воздух, поскольку в этот день T_{cp} и T_{max} достигли соответственно $26,1$ и $33,0^\circ\text{C}$, показатели влажности e , a и q — соответственно 20 гПа, 15 г/м³ и 12 – 13 г/кг, а дальность видимости D — от 4 до 10 км (помимо характерных вообще для кТВ малых значений этого показателя, его уменьшению также способствовали условия дымной мглы). После полуночи 19 августа тропический воздух начал быстро вытесняться полярным: предположительно континентальной полярной массой (кУВ), прежней морской (мУВ), пришедшей в Западную Европу из района Северного моря за 3 сут до этого дня. Переходный тип данной воздушной массы подтверждается большинством показателей: $T_{\text{cp}} = 20,3^\circ\text{C}$; $T_{\text{max}} = 24,4^\circ\text{C}$; e — от 15 до 19 гПа; a — от 11 до 14 г/м³; q — от 9 до 12 г/кг; $D = 10$ км. Заметим, что днем 19 августа Москва находилась в зоне малоподвижного фронта окклюзии, так что значения характеристик влажности могли быть не вполне показательными для оценки географического типа воздушной массы. Наконец, приблизительно в 3 ч 20 августа Москву прошел обостренный холодный фронт в системе циклона с центром над Средним Поволжьем, в тылу которого началось быстрое вхождение арктической воздушной массы из Баренцева моря. Уже к вечеру 20 августа, а также почти весь следующий день (см. рис. 3, в) значения метеорологических величин, особенно показателей влажности, были типичными для свежепришедшего арктического воздуха: e — от 7 до 9 гПа; a — от 5 до 7 г/м³; q — от 4 до 6 г/кг; D — вплоть до 25 км. Заметим, что само по себе арктическое происхождение этого воздуха не вызывает сомнений, отнесение же его к подтипу морского или континентального арктического воздуха неочевидно, поскольку очаг этой воздушной массы находился вблизи границы географических районов формирования мАВ и кАВ (соответственно открытой водной поверхности и морских льдов в Баренцевом море [14]), а характеристические значения для обоих подтипов близки. Связанное с приходом этой воздушной массы быстрое похолодание и ознаменовало собой окончательное завершение аномальной жары.

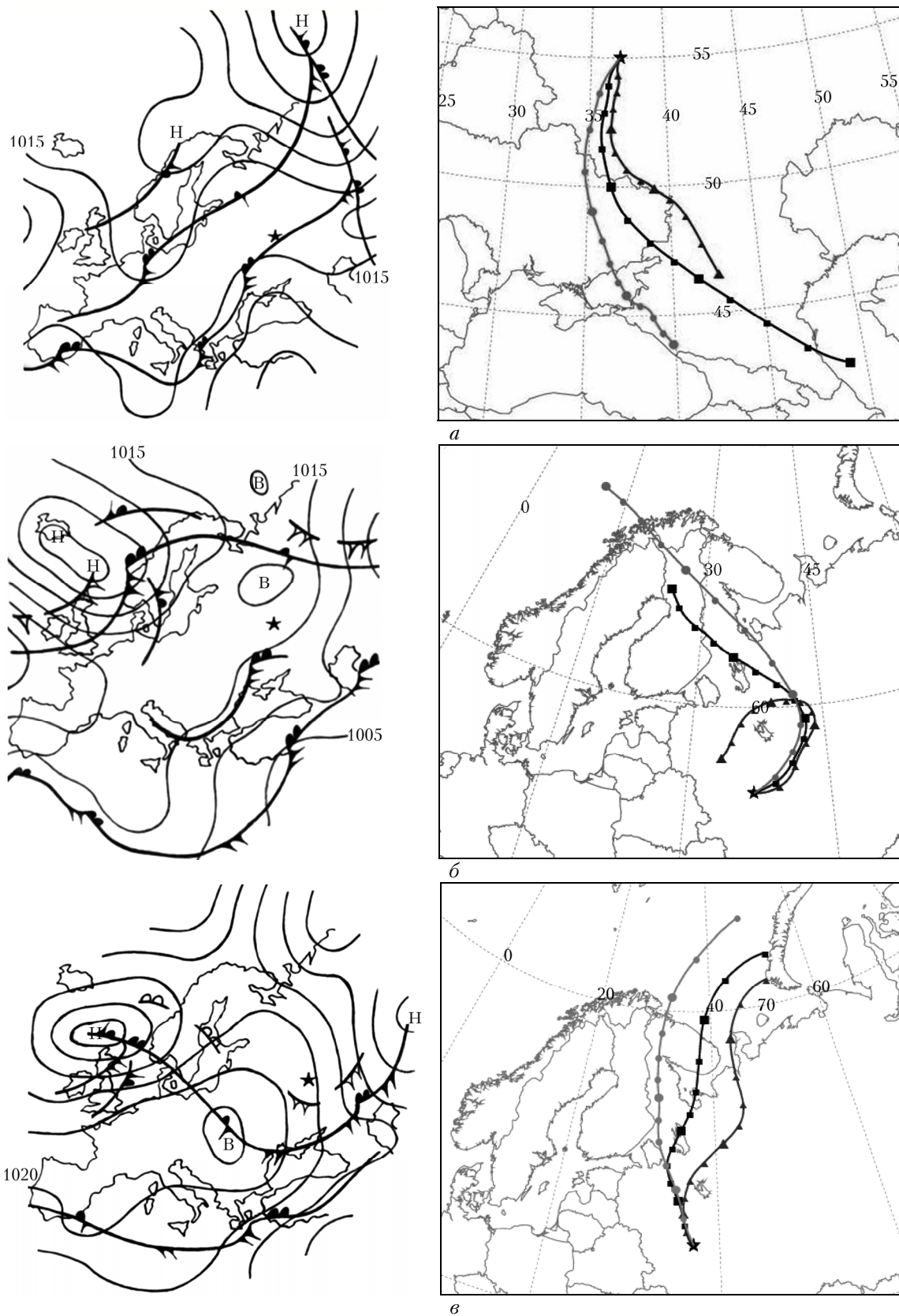


Рис. 3. Карты приземного анализа и обратные траектории воздушных частиц при господстве разных воздушных масс летом 2010 г.: *a* – 2 августа 2010 г. за 00 ч по Гринвичу, тропическая воздушная масса; *б* – 5 июля 2010 г. за 00 ч по Гринвичу, полярная воздушная масса; *в* – 21 августа 2010 г. за 00 ч по Гринвичу – карта, за 12 ч – обратные траектории, арктическая воздушная масса. Москва показана звездочкой; треугольники – траектории на уровне 1 км; квадраты – на уровне 2 км; кружки – на уровне 3 км

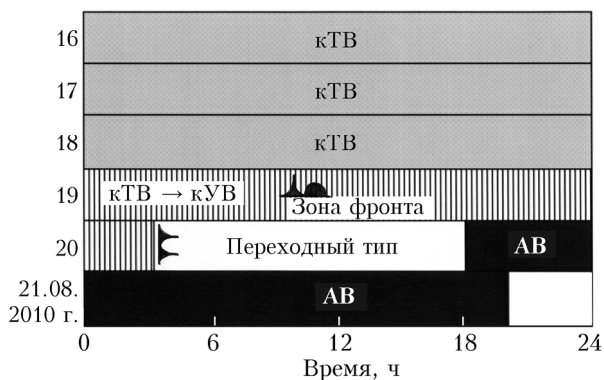


Рис. 4. Пример результатов синоптического анализа типа воздушной массы за период с 16 по 21 августа 2010 г.

В результате проведенного анализа периода с 11 июня по 22 августа 2010 г. были составлены частные выборки данных радиозондирования, полученных в условиях господства разных типов воздушных масс. Наиболее обеспеченной данными, естественно, оказалась выборка континентального тропического воздуха, господствовавшего летом 2010 г. полностью или частично в продолжение 53 дней. В эту же выборку были включены и случаи, когда тропическая масса, сохраняя свои основные признаки, была частично трансформирована в континентальную полярную (кТВ → кУВ). Таким образом, повторяемость господства над Москвой летом 2010 г. тропического воздуха, свежепришедшего или частично трансформированного, превысила половину всего календарного времени. Заметим, что, по данным [16], средняя доля дней с господством кТВ составляет летом в Москве обычно только 5%, а в особо жаркие месяцы в прошлом (в июне и июле 1936 и в августе 1938 гг.) она достигала лишь 30–40%.

Остальные три выборки относительно ярко выраженных (нетрансформированных) типов воздушных масс — свежепришедших морского полярного (мУВ), континентального полярного (кУВ), а также морского и континентального арктического воздуха — представлены соответственно лишь двумя, тремя и четырьмя днями (при этом одним или двумя отдельными промежутками времени). Средние для каждого из типов профили температуры приведены на рис. 5 (пропуски в данных при их расчетах из-за запретов в отдельные дни были восполнены результатами радиозондирования на соседней аэрологической станции Сухиничи).

Как видим, расположение этих профилей в ряд от холодных к теплым воздушным массам совпадает с ожидаемыми адвективными изменениями температуры при господстве каждого из данных типов воздушных масс летом на ЕТР. Отметим, что температурные условия арктического и морского полярного воздуха близки в летние месяцы не только у поверхности Земли, но и в нижней тропосфере. Различия их по сравнению с тропическим воздухом огромны: T в условиях АВ и мУВ даже в середине дня была существенно меньше, нежели при господстве кТВ ночью. Континентальный же полярный воздух, являющийся в наших широтах местной воз-

душной массой, занимает промежуточное положение между жарким кТВ и прохладными мУВ и АВ. Различия между тропическим воздухом и остальными типами как днем, так и ночью статистически значимы с доверительной вероятностью 0,95. Заметим также, что приземные инверсии ночью в условиях господства кТВ и кУВ в среднем более интенсивные (около 4–5 °С), нежели в остальных двух типах, связанных с условиями холодной адвекции (лишь около 3 °С).

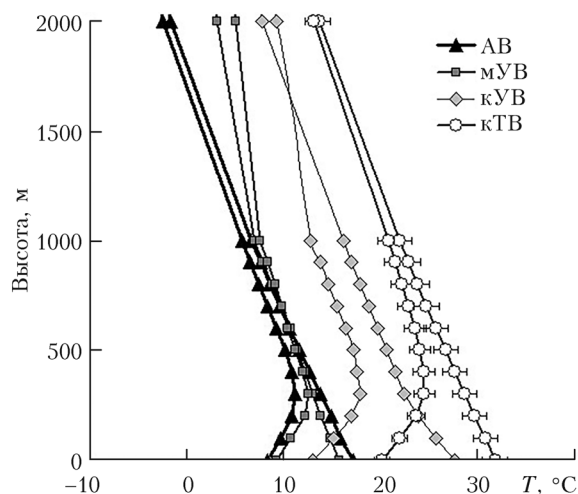


Рис. 5. Профили температуры воздуха по данным радиозондирования в разных типах воздушных масс летом 2010 г. Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 0,05

Общая сходимость ночных и дневных профилей с высотой хорошо прослеживается в арктическом и тропическом воздухе, а в остальных двух типах однозначного сближения нет вследствие недостаточного размера их выборок. Таким образом, приведенные результаты служат примером синоптического анализа, осуществленного с использованием аэроклиматических данных. Разумеется, наиболее надежны здесь температурные профили, рассчитанные для условий господства кТВ и кТВ → кУВ как выборки, наиболее обеспеченной данными.

Заключение

Итак, аномальная жара летом 2010 г. в Москве проявилась не только у поверхности, но и во всей толще нижней (а возможно, и всей) тропосферы. На всех высотах вплоть до 2 км в это время были достигнуты рекордно высокие значения температуры воздуха, по меньшей мере за предыдущие два десятилетия. Условия блокирующего антициклона проявились ночью в более мощных и более интенсивных приземных инверсиях вследствие ясной и тихой погоды; днем они не привели к усилению неустойчивой стратификации вследствие влияния теплой адвекции. Наконец, континентальный тропический воздух, господствовавший над Москвой летом 2010 г. более половины всего времени, характеризовался значительно более высокой температурой воздуха по сравнению с остальными типа-

ми воздушных масс на всех высотах в пределах нижней тропосферы.

Авторы благодарят А.М. Кабака и Ю.И. Юсупова за предоставленные синоптические карты, а также А.П. Каца и А.Е. Корнеева за аэрологические данные. Работа выполнена при частичной поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований, проект № 14-05-00594.

1. *Коковин Н.С.* Радиотелеметрия зондирования атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 164 с.
2. *Ivanov A., Katz A., Kurnosenko S., Nash N., Zaitseva N.* WMO International Radiosonde Comparison, Phase III, Instruments and Observing Methods, Report N 40. WMO/TD-No. 451, 1991. Dzambul, USSR, 1989. P. 172.
3. *Володин Е.М.* О природе некоторых сверхэкстремальных аномалий летней температуры // Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 г. / Под ред. Н.П. Шакиной. М.: Триада ЛТД, 2011. С. 48–57.
4. *Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б., Березина Е.В., Елохов А.С., Иванов В.А., Панкратова Н.В., Постыляков О.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А.* Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 1–10.
5. *Локощенко М.А.* Катастрофическая жара 2010 года в Москве по данным наземных метеорологических измерений // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 523–536.
6. *Barriopedro D., Erich E.M., Luterbacher J., Trigo R., Garcia-Herrera R.* The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe // *Sci.* 2011. V. 332. P. 220–224.
7. *Наставление* гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 4. Аэрологические наблюдения на станциях. СПб.: Савож, 2004. 311 с.
8. *Воронцов П.А.* Аэрологические исследования пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1960. 450 с.
9. *Девятова В.А.* Микроаэрологические исследования нижнего километрового слоя атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1957. 144 с.
10. *Типовые* характеристики нижнего 300-метрового слоя атмосферы по измерениям на высотной мачте / Под ред. Н.Л. Бызовой. М.: Гидрометеоздат, 1982. 68 с.
11. *Хргиан А.Х.* Физика атмосферы. М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1953. 456 с.
12. *Аверкиев М.С.* Метеорология. М.: Из-во МГУ, 1951. 384 с.
13. *Локощенко М.А.* Применение содарного зондирования для исследования влияния синоптических условий на стратификацию температуры // *Оптика атмосф. и океана.* 1998. Т. 11, № 5. С. 480–489.
14. *Алисов Б.П.* Климатические области и районы СССР. М.: ОГИЗ, Географгиз, 1947. 212 с.
15. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 712 с.
16. *Хромов С.П.* Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1948. 696 с.
17. URL: <http://www.ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>

M.A. Lokoshchenko, I.A. Korneva, A.Z. Dubovetsky, A.V. Kochin. Air temperature in the lower troposphere over Moscow during heat wave in summer of 2010.

Dynamics of the air temperature in the lower 4 km layer have been studied by the data of radio-sounding in Dolgoprudny and ground meteorological measurements at Moscow University in time of anomalous heat wave in summer of 2010. The results have been compared with the aero-climatic data during previous 19 years. Accordingly to these data average estimations of both the daily vertical thermal gradient values, thickness, and intensity of nocturnal surface inversions (correspondingly, 200–300 m and 2.0 °C) are presented for Moscow region. As it shown, in summer of 2010 in the air layer up to 2 km height over Moscow record high air temperature was noted for the period from at least 1991. Among others, the 30 °C value has been detected for the first time in the air layer from 400 to 800 m.

During heat wave in 2010, as a result of clear anticyclone conditions, thickness, and intensity of nocturnal surface inversions were larger than usually (up to 700 m and 12 °C correspondingly). The mean temperature profiles have been studied for different types of air masses. As it shown, the tropical air mass dominated over Moscow region in summer of 2010 during more than half of the time.